

УДК 62.135

В.Г. СОЛОДОВ, д-р техн. наук; проф. ХНАДУ, г. Харьков
А.А. ХАНДРИМАЙЛОВ, канд. техн. наук; ас. ХНАДУ, г. Харьков
Е.В. ЛЕВЧЕНКО, канд. техн. наук; первый зам. генерального директора –
генеральный конструктор ОАО «Турбоатом», г. Харьков
В.Л. ШВЕЦОВ, главный конструктор ПТ и ГТ ОАО «Турбоатом», г. Харьков
В.А. КОНЕВ, начальник сектора ОАО «Турбоатом», г. Харьков

ОПЫТ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ОТСЕКА «ЦСД-ЦНД1» ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ К-325-23,5

Викладено досвід аеродинамічного удосконалення конструкції відсіку «ЦСТ-ЦНТ1» парової турбіни К-325-23,5. Дискутується вплив формоутворення елементів проточної частини відсіку на структуру течії, газодинамічні і енергетичні характеристики відсіку.

The experience of aerodynamic improvement of design of «I.P-L.P1» compartment of steam turbine K-325-23,5 is presented. The effect of elements of compartment flow path is discussed on the flow pattern and on the aerodynamic and power characteristics of compartment.

В работе рассматриваются некоторые аспекты модернизации проточной части выходного отсека ЦСД турбины К-325-23,5 (рис. 1), включающего последнюю ступень ЦСД (1), первую ступень первого потока НД1 (2), камеру отбора (3) и участки ресиверов (4). Камера отбора (КО) условно разделяется поверхностью тока (5) на нижнюю кольцевую часть, через которую пар из корневой части ступени СД проходит транзитом в ступень НД1 (38,7 % расхода через ступень СД), и собственно камеру отбора, которая служит для перепуска пара из периферийной части ступени СД в ресиверы (4) и далее к патрубку паровпуска двухпоточного ЦНД.

1 Цель работы, постановка задачи о течении в отсеке

Данная статья обобщает работы авторов [1, 2]. Рассматриваются результаты исследования влияния ряда конструктивных решений на совершенствование газодинамических и энергетических характеристик выходного отсека ЦСД.

В настоящей работе исследуются новые решения по совершенствованию ступеней СД и НД1, формообразованию дополнительных элементов с целью повышения экономичности отсека турбины. В работе решается задача об установившемся трехмерном вязком турбулентном течении пара через рассматриваемый отсек на стационарном режиме. На входе в ступень СД задаются интегральный расход и параметры торможения, на выходе из труб – статическое давление, на выходе из ступени НД1 задается расход.

2 Численное решение газодинамической задачи

При газодинамическом моделировании отсека «ступень-патрубок-ступень» для обеспечения интерфейса между ступенями и патрубком используется секторный подход (см. например [3]), который предполагает разбиение подключенной ступени на несколько секторов с осреднением входных, и выходных параметров потока на

интерфейсе в окружном направлении в рамках одного сектора. Принципиальная схема построения секторной модели отсека приведена на рис. 2. Возможность применения такого подхода для рассматриваемого отсека оправдана малыми окружными градиентами параметров в камере отбора, и ведет к экономии времени расчета и вычислительных ресурсов.

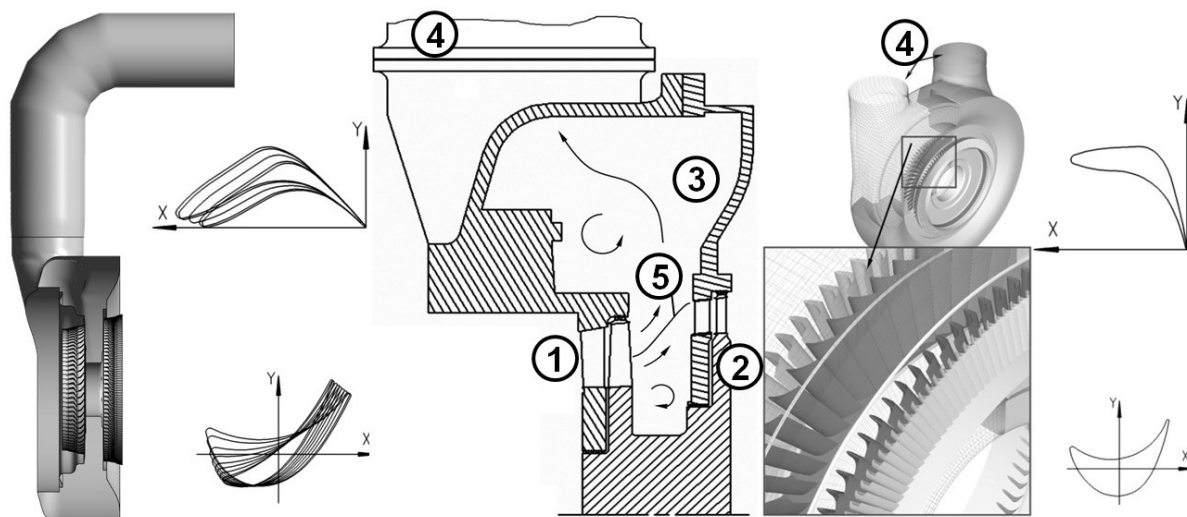


Рис. 1. Схема расчетной области

Течение в расчетных подобластях ступеней и патрубка описывается системой нестационарных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу-Фавру. Расчетные подобласти аппроксимированы неструктурированными гексаэдральными сетками. Исследование выполнено с помощью программного комплекса *MTFS[®] software* [4], который тестирован в [3].

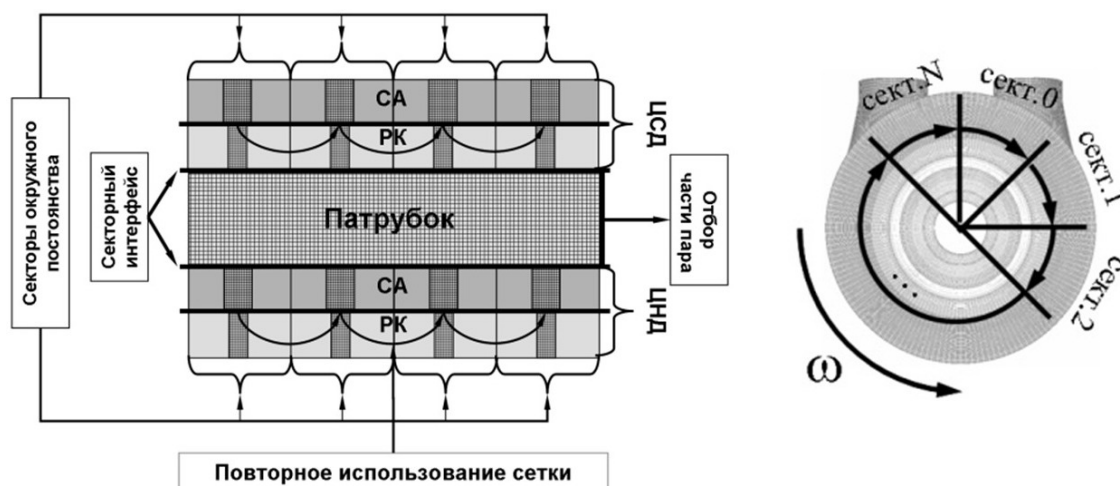


Рис. 2. Принципиальная схема секторной модели отсека

В расчетах твердые стенки принимаются адиабатическими, на них ставится условие прилипания и равенство нулю эффективной вихревой вязкости. Интенсивность турбулентности TU на входе в отсек принята равной 5 %. Турбулентные эффекты учитываются комбинировано с помощью дифференциальных моделей турбулентности Спаларта-Аллмараса (область камеры отбора (3) и участков ресиверов (4)) и SST Ментера (каналы ступеней (1, 2), диффузора) [3]. Переключение моделей реализовано с

использованием масштаба, составляющего 1 % длины хорды соплового профиля на среднем радиусе.

В типовых расчетах численная модель патрубка содержала около $5,0 \times 10^6$ ячеек, что обеспечило переменную погрешность $y^+ < 4,5$. В моделях ступеней ЦСД и НД1 не учитывались радиальные уплотнения; каждый межлопаточный канал содержал около $4,5\text{--}5 \times 10^5$ ячеек, что обеспечило $y^+ < 2,0$. В исследовании анализировалась эффективность вариантов модели отсека: для 16 секторов ступени СД; для 16 секторов ступени НД1. Ввиду слабого обратного влияния патрубка на течение в ступени СД, а также окружного выравнивания параметров в объеме камеры отбора основные расчеты выполнены для патрубка с четырьмя секторами интерфейса ЦСД и ЦНД1. Расчеты течения в отсеке проводились по данным, полученным из теплового расчета турбины на номинальном и частичном ($0,7G$) режимах.

3 Обсуждение результатов исследования исходного отсека [1]

Последняя ступень СД представлена сопловой лопаткой с удлинителем и рабочей лопаткой переменного профиля с основными параметрами на среднем радиусе: $\bar{l}_c = 2,60$, $\bar{l}_p = 2,90$; относительные шаги $\bar{t}_c = 0,548$, $\bar{t}_p = 0,77$; толщины выходных кромок $\Delta_c = 0,36$ мм, $\Delta_p = 1,05$ мм; отношение чисел лопаток $Z_c : Z_p = 82 : 60$.

Первая ступень НД1 имеет рабочую лопатку постоянного профиля. Основные параметры ступени на среднем радиусе: $\bar{l}_c = 1,86$, $\bar{l}_p = 4,02$; относительные шаги $\bar{t}_c = 0,67$, $\bar{t}_p = 0,73$; толщины кромок $\Delta_c = 0,32$ мм, $\Delta_p = 0,5$ мм; $Z_c : Z_p = 106 : 196$; частота вращения $\omega = 25 \text{ с}^{-1}$. Геометрическая степень расширения тракта «ЦСД-ЦНД1» $A_{\text{вых}}/A_{\text{вх}}$ составляет 1,5, для потока отбора 2,0.

Интегральные газодинамические и энергетические характеристики элементов проточной части отсека вычислялись в характерных сечениях: на входе в ступень, в межвенцовом зазоре, за рабочей решеткой ступени на расстоянии трех толщин выходной кромки, а также в выходном сечении отводов из камеры отбора (4), являющимся входным сечением ресиверов. Осреднение параметров в этих сечениях выполнялось по расходу в соответствии с методикой [5]. Область вихря в сечении при осреднении исключалась из рассмотрения по рекомендации проф. А.В. Гаркуши. Интегральные внутренние потери кинетической энергии (КЭ) и потери полного давления (ПД) на участках между сечениями канала определялись в слоях равного расхода по общепринятым формулам [5, 6].

Структура течения в исходном отсеке. По результатам расчетов ступень ЦСД в составе исходного отсека перегружена, выход пара неосевой, увеличены потери с выходной скоростью. В результате закрутки потока за ступенью СД нарушается равенство расходов в ресиверы. Дисбаланс расходов в трубы при одинаковых противодавлениях на выходе из ресиверов изменяется во времени и достигает 15–17 %. В целом течение в КО носит нестационарный характер. Высокоскоростная закрученная струя (средняя скорость около 120 м/с) из периферийной части рабочего венца СД ускоряется в зоне торца обода диафрагмы ступени НД1 с последующей интенсивной диссипацией энергии в объеме камеры отбора при высокой неравномерности поля скоростей на входе в ресиверы, что также увеличивает потери ПД в ресивере. Неустановившееся поведение струи отбора, невозможность ее прилегания к стенкам КО, приводят к пульсациям расхода на входе в ресивер свыше 1 %. Частота главной

гармоники колебаний расхода в ресиверы и дисбаланса расходов находится в промежутке 10–15 Гц. Отмечаются колебания параметров на выходе ступени СД и на входе в ступень НД1, в частности, статического давления – до 1 кПа.

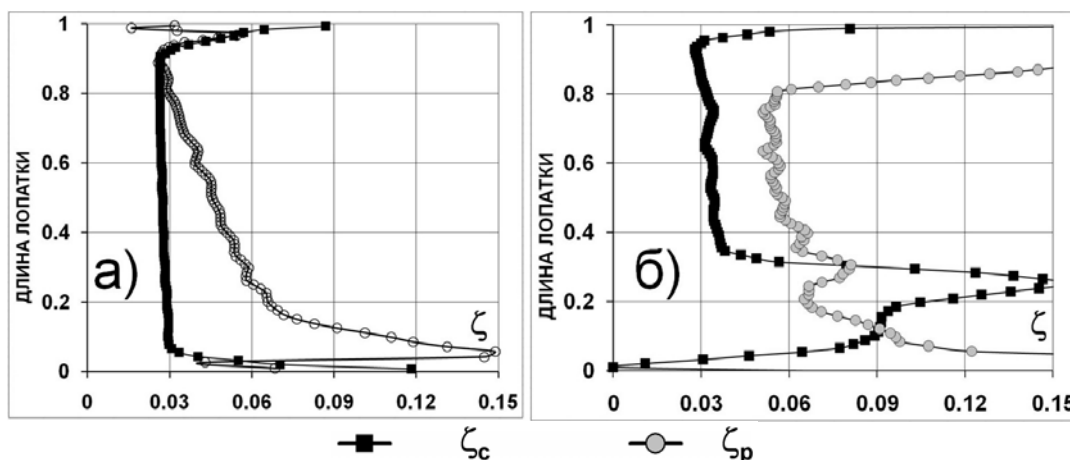


Рис. 3. Осредненные вдоль окружности радиальные распределения потерь КЭ в ступенях СД (а) и НД1 (б)

Ступень СД в составе отсека показывает потери КЭ в соплах, отнесенные к перепаду на канал, около 3,15 %; потери КЭ на рабочих лопатках, отнесенные к перепаду на канал, составляют 4,8 % (рис. 3), что соответствует потерям при изолированной продувке [1]. При этом неравномерность распределения потерь КЭ на рабочей решетке вследствие окружной неравномерности не превосходит 0,1 %.

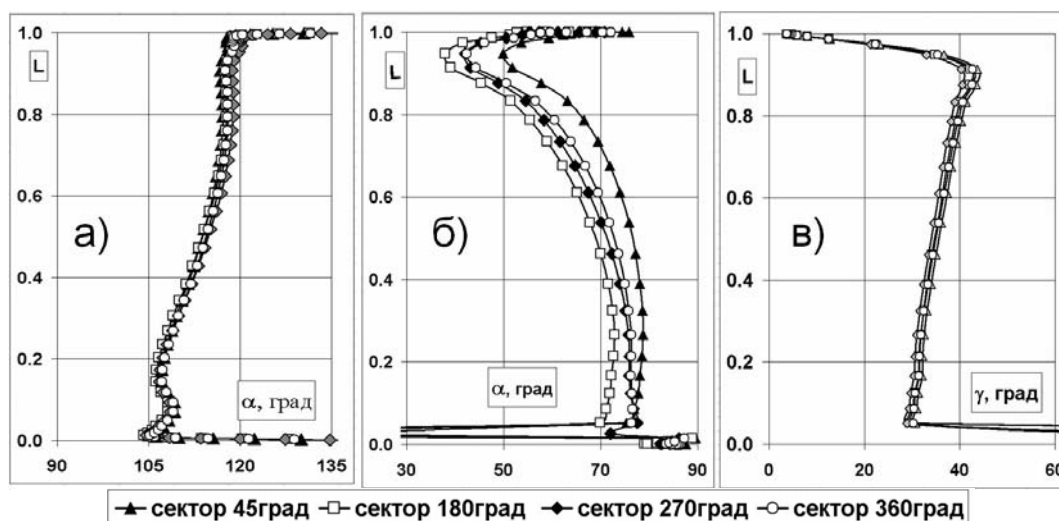


Рис. 4. Радиальные распределения углов потока в сечениях за ступенью СД (а) и перед ступенью НД1 (б, в) в абсолютном движении; (отсчет секторов по часовой стрелке по ходу пара)

Условия входа транзитного потока в каналы диафрагмы ступени НД1 являются неблагоприятными, характеризуются углом атаки сопловых лопаток в тангенциальной плоскости (рис. 4) и меридиональным углом γ в интервале 30–40 град [1]. Вблизи втулки на входе в диафрагму образуется отрыв потока, который занимает до 20 % высоты лопатки диафрагмы. На периферии входа в диафрагму поток испытывает торможение с последующим ускорением.

Оценка величин потерь в транзитном потоке из ступени СД в ступень НД1 ζ_k^* и в потоке отбора от ступени СД до выходного сечения отводов из камеры отбора ζ_{Π}^* выполнялась отдельно. В качестве критерия принят коэффициент потерь полного давления $\zeta_{k(\Pi)}^* = (P_{вх}^* - P_{вых}^*) / E_{вх}$, где $E_{вх}$ – кинетическая энергия потока за соответствующей частью ступени СД. Сравнение осредненных значений полного давления на выходе из секторов СД и на входе в ступень (либо ресивер) производилось по секторам, а затем вычислялось среднее по расходу значение $\zeta_{k(\Pi)}^*$ для всего потока отбора.

В расчетах [1] получены коэффициенты потерь ПД $\zeta_k^* = 0,18$ и неравномерности поля скорости перед ступенью НД1 $\chi_0 = C_{0cp} / C_{0cp,расх} = 1,88$ для транзитного потока от ступени СД к ступени НД1. Оба фактора определяются взаимодействием транзитного потока с вихревым течением в полости камеры отбора вдоль условных граничных поверхностей тока, а также отрывом потока от корневого обвода сопловой решетки ступени НД1.

В потоке отбора пара на НД2,3 на участке от ступени СД до выходного сечения отводов из камеры отбора получено среднее во времени значение ζ_{Π}^* около $\sim 1,5$, что соответствует около 77 % суммарных потерь от ступени СД до первых ступеней двухпоточного ЦНД. Столь значительный уровень потерь определяется высокими скоростями пара в кольцевой струе отбора, сложной формой траекторий частиц потока и обширными зонами вихревых течений.

Потери КЭ в соплах ступени НД1, отнесенные к адиабатическому перепаду на канал, в составе отсека составляют около 5,3 % ввиду неблагоприятных углов натекания на входные кромки; потери КЭ на рабочих лопатках составляют около 7,7 % (рис. 3б, рис. 8). Дополнительно, вследствие постоянного профиля рабочей лопатки средний и периферийные пояса обтекаются с ударом в спинку, что приводит в верхней части лопатки к отрывным явлениям на вогнутой поверхности лопатки [1].

4 Направления модернизации и их сравнительный численный анализ

4.1 Модернизация рабочего венца ступени ЦСД

Для обеспечения осевого выхода пара и направления части потока в 1-ю ступень НД1 в модернизированной ступени СД (рис. 5, № 1) увеличено отношение D_r/l_r с величины 5,08 до 5,47 за счет увеличения корневого диаметра и уменьшения высоты лопатки, а также увеличен наклон меридиональных обводов до 10 град. Это позволило устранить закрутку потока за ступенью и увеличить отклонение потока в радиальном направлении. Модернизированная ступень СД обеспечила практически осевой выход потока и окружной КПД на уровне исходной ступени для рассмотренных режимов, несмотря на увеличение радиальности в рабочей решетке. При этом дисбаланс расходов в ресиверы не превысил 1 %.

4.2 Модернизация тракта паровпуска «ЦСД-1-я ступень ЦНД1» и ступени ЦНД1

Ступень НД1 подверглась более существенной модернизации с целью устранения корневого отрыва в сопловой решетке (рис. 5, №2, рис. 7б) и уменьшения потерь как в сопловой, так и в рабочей решетках. С этой целью увеличены углы наклона меридиональных обводов в сопловой решетке в корне на 3 град и на

периферии на 10 град, а также в корне рабочей решетки на 4 град. Рабочая лопатка выполнена с переменным профилем вдоль радиуса (рис. 5). Сформирован подвод потока к соплам путем существенного уменьшения кривизны входной кромки тела диафрагмы (5) и удлинения входной кромки обода диафрагмы (6), а также с помощью установки профилированной втулки (5) для направления транзитного потока в НД1 и отделения его от зоны вихревых течений в межступенчатом пространстве (рис. 5).

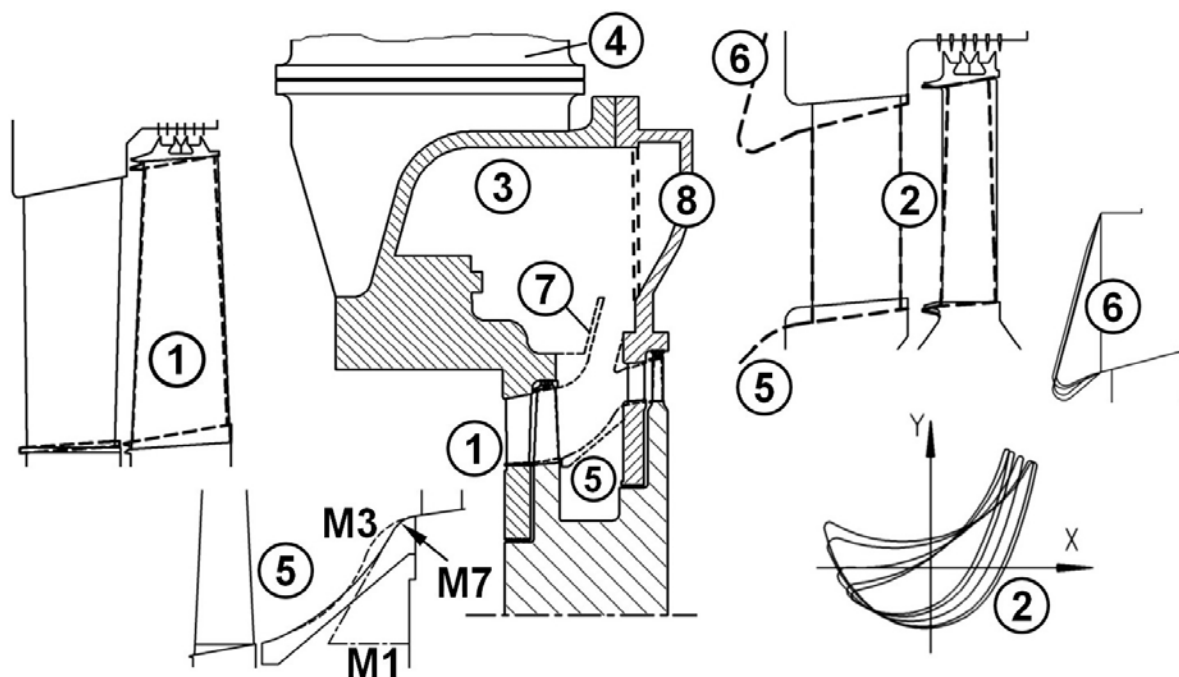


Рис. 5. Схема отсека и основных мероприятий по модернизации

Эвристический поиск рациональной формы направляющей втулки (5) и разделителя потоков (6) на входе в ступень НД1 позволил из серии модификаций (рис. 5) выбрать рациональный вариант (рис. 5, вариант М7, рис. 7б) в рамках технологических ограничений из соображений обеспечения минимальной неравномерности поля скоростей на входе в ступень НД1 и безотрывного течения в корневой зоне сопловой решетки. Значения потерь КЭ для вариантов даны на рис. 8.

Структура течения в камере отбора для нескольких последовательных вариантов приведена на рис. 9. Здесь К325 – исходный вариант, M_i – модификации (рис. 5). В итоге наиболее эффективный вариант формы в сочетании со специальным профилированием входа в диафрагму ступени НД1 показал уменьшение коэффициента потерь полного давления в потоке от ступени СД до ступени НД1 с 0,18 до 0,04. Выбор осуществлялся в комплексе с изменением формы разделителя потоков (6) рис. 5.

В результате модернизации значительно улучшились условия работы первой ступени НД1. Исчезновение закрутки течения за ступенью СД снизило углы атаки сопловых лопаток ступени НД1. Существенно уменьшился меридиональный угол течения на входе в сопла НД1, течение фактически стало безотрывным, что снизило интенсивность подковообразного вихря и канального вихря в рабочем венце. В итоге потери КЭ на ступени НД1 снизились в соплах с 5,3 % до 3,7 %, в каналах рабочей решетки с 7,7 % до 5,1 %.

4.3 Модернизация тракта отбора

Потери полного давления в камере отбора от ступени СД до входных сечений ресиверов, которые достигали значения $\zeta_{\Pi}^* \cong 1,5$, а также характеристики нестационарности в КО в результате описанной в п.п. 4.1–4.2 модернизации отсека практически не изменились (рис. 12).

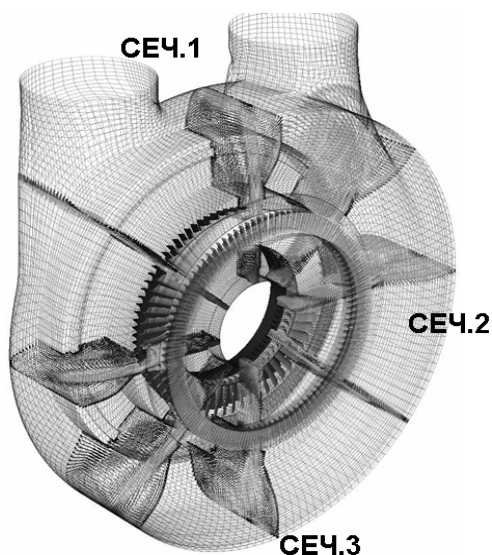


Рис. 6. Структура течения в исходном отсеке

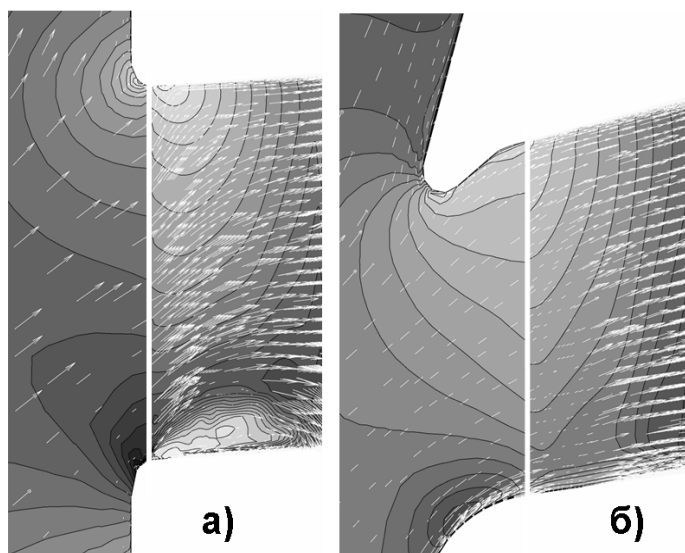


Рис. 7. Структура течения и поле скоростей на входе в сопловую решетку в исходном и модернизированном (М7) вариантах отсека

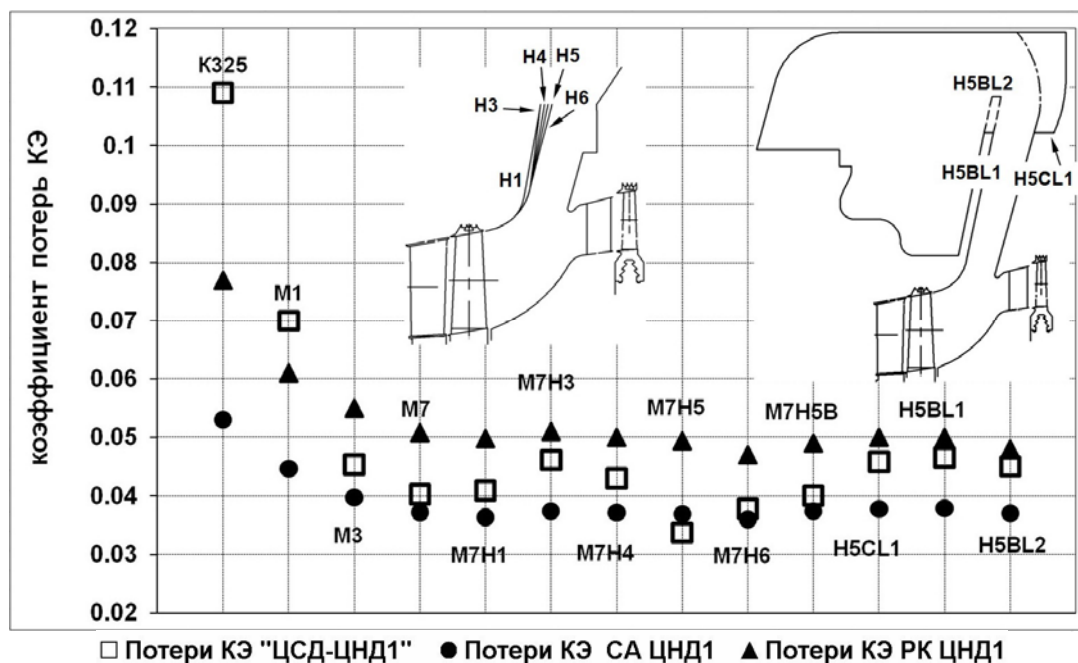


Рис. 8. Потери кинетической энергии в каналах ступени ЦНД1, и на тракте «ЦСД-ЦНД1» в исходном патрубке и на этапах модернизации; схемы исследованных диффузоров

Вместе с тем, снижение потерь в камере отбора и уровня нестационарности течения являются существенным резервом повышения экономичности и надежности турбоагрегата.

Поэтому был реализован этап модернизации отсека, заключающийся в организации диффузорного течения в потоке отбора. Вогнутый обвод осерадиального диффузора с принятой конструктивно радиальностью $\bar{D}_2 = 1,4$ образован разделительной поверхностью тока между потоками в НД и в ресиверы, торцом обода диафрагмы НД1 и радиальным участком стенки корпуса ЦНД1 (8, рис. 5). Выпуклый обвод образован специальной профилированной кольцевой обечайкой (7, рис. 5).

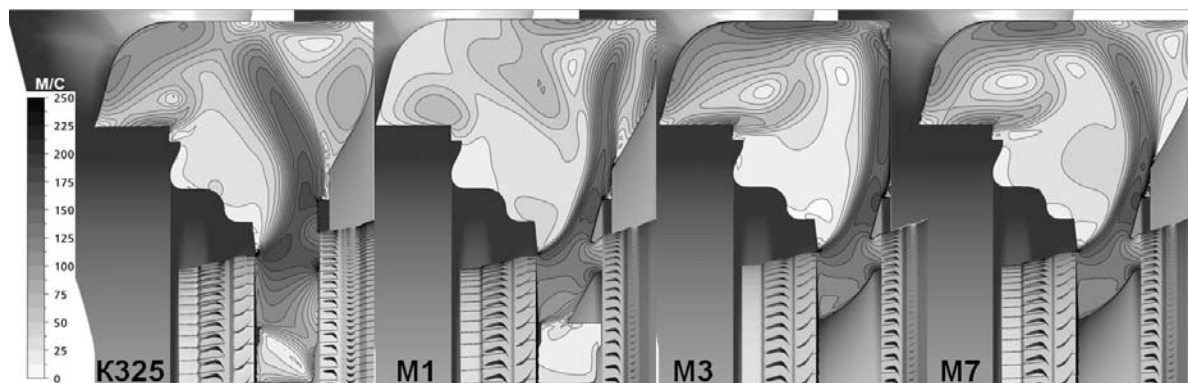


Рис. 9. Структура течения в исходной камере отбора и на этапах модернизации

В рамках конфигурации модернизированного отсека М7 исследована серия радиальных диффузоров Hi , учитывающих особенности конструкции (рис. 10). Диффузор М7Н5В отличался от аналога М7Н5 отсутствием технологической кольцевой выемки над разделителем потоков (6). Результаты внедрения диффузоров в отсек показаны на рис. 8, 10–13. Из серии технологичных диффузоров с радиальностью $\bar{D}_2 = 1,4$ лучшие результаты показал вариант М7Н5 со степенью расширения $A_{\text{вых}}/A_{\text{вх}} \approx 1,41$. Данный вариант реализует безотрывное течение на верхней половине дуги выхлопа в КО (рис. 11) с максимальным для серии интегральным коэффициентом восстановления давления [6] $\xi = 0,24$. На нижней дуге (вдали от ресиверов) выхлоп остается отрывным вблизи выходного сечения диффузора, что указывает на наличие резерва совершенствования, например внедрение диффузора с переменной вдоль окружности площадью выхлопа.

Течение в диффузоре Н5 является радиальным. Струя за диффузором в камере отбора остается нестационарной, однако ее кинетическая энергия и размах колебаний параметров заметно ниже, чем в исходном варианте М7 модернизированного отсека. Кроме того, колебания полей давления и скорости практически не проникают из КО в кольцевую транзитную струю от ступени СД до ступени НД1.

Увеличение радиальности диффузора Н5 с продлением поверхности обода диафрагмы ступени НД1 до $\bar{D}_2 = 1,64$ (Н5ВЛ1) и $\bar{D}_2 = 1,78$ (Н5ВЛ2) незначительно снижает коэффициент потерь ПД, но приводит к увеличению потерь КЭ транзитного потока (рис. 8), и не может оправдать затрат на его реализацию.

С выбранным вариантом диффузора Н5 коэффициент потерь ПД на тракте выходного сечения верхней части ступени СД до входа в ресиверы составил $\zeta_{\text{пд}} \approx 0,81$, что почти в 2 раза ниже, чем в исходном варианте. При этом аэродинамические и энергетические характеристики ступеней СД, НД1 не изменились (рис. 8), а потери полного давления от ступени СД до ступени НД1 снизились на 15 %.

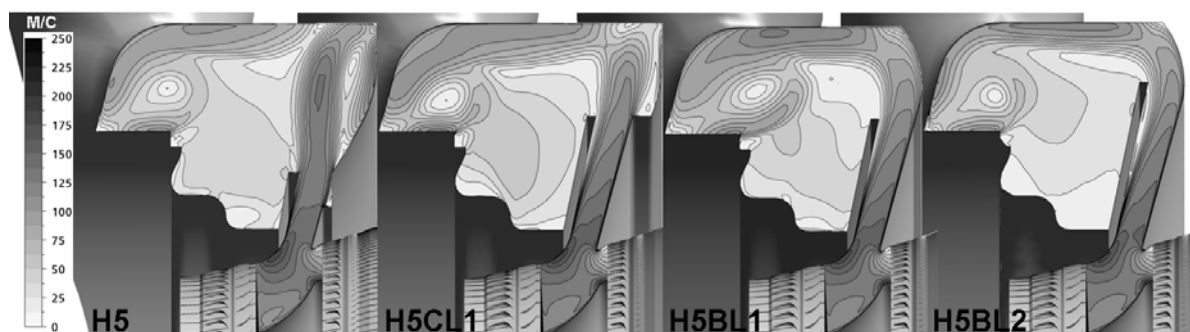


Рис. 10. Структура течения в патрубке с вариантами диффузора

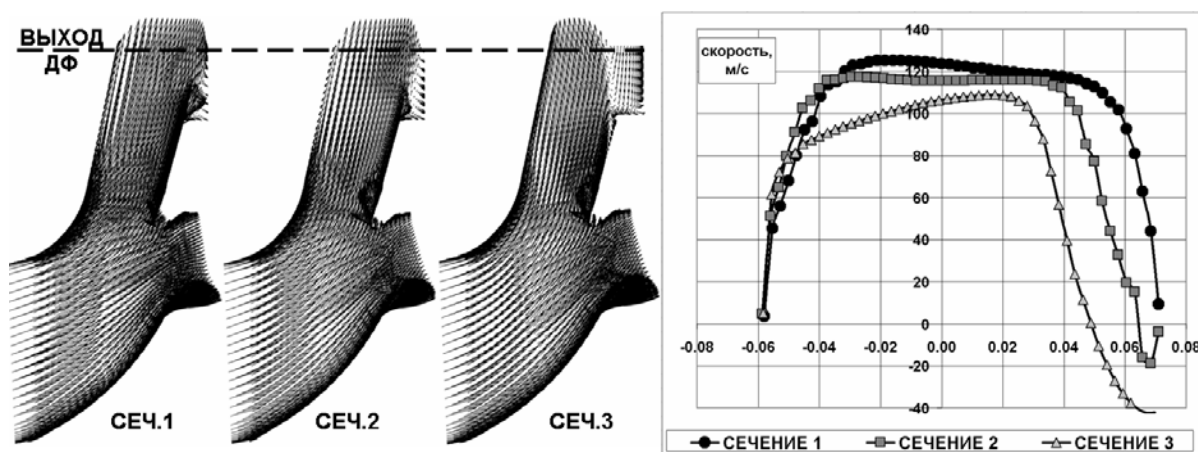


Рис. 11. Распределения скорости на выходе из диффузора Н5 в сечениях патрубка на рис. 6

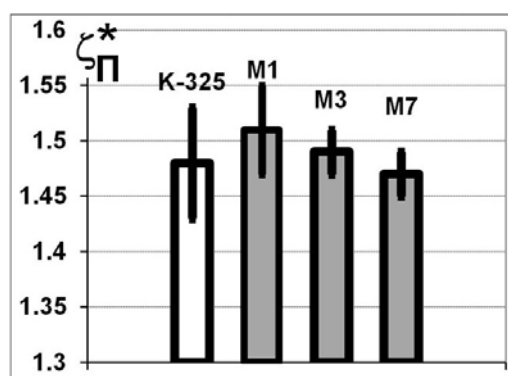


Рис. 12. Потери ПД в камере отбора для исходного отсека и бездиффузорных вариантов (рис. 9)

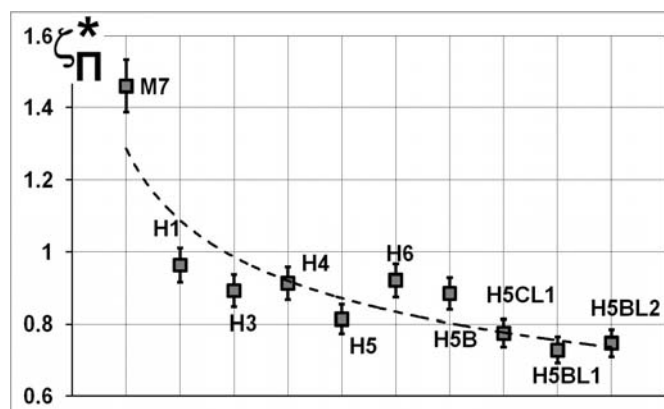


Рис. 13. Потери ПД в камере отбора для отсека М7 и вариантов H_i со встроенными диффузорами (рис. 10)

Заключение

1. На примере турбины К-325-23,5 поставлена и решена задача о совершенствовании газодинамических и энергетических характеристик выходного отсека ЦСД мощной паровой турбины. Проблема совершенствования отсека может быть разделена на три части.

1.1 Совершенствование РК ЦСД для обеспечения осевого выхода потока пара с некоторым увеличением радиального скоса потока. Это мероприятие обеспечивает равенство расходов в ресиверы к ЦНД2,3 и улучшает условия входа в диафрагму НД1.

1.2 Определение рациональной формы направляющей втулки для транзитного потока ЦСД-ЦНД1 и формы входной части обода диафрагмы ступени НД1 с учетом общей граничной поверхности тока потоков отбора в ресиверы и в ступень НД1. Это мероприятие позволяет существенно снизить потери тракта и потери КЭ в ступени НД1. Сюда же относится внедрение РК НД1 переменного профиля.

1.3 Формирование осерадиального диффузора для потока отбора пара на ЦНД2,3 за счет установки специальной кольцевой обечайки за ступенью СД на периферии, которая также является материальной границей между потоком отбора и вихревым течением в камере отбора. Данное мероприятие является основным в снижении потерь полного давления в отсеке, приводит к стабилизации и стационарности радиального течения пара в диффузоре, что благоприятно сказывается на нагруженности ступеней.

2. Выбор рациональной формы проточной части отсека «ЦСД-ЦНД1» позволил уменьшить коэффициенты потерь полного давления в тракте «СД-НД1» с 0,18 до 0,037 (Н5, рис. 8), в тракте отбора пара на ЦНД2,3 в зоне камеры отбора с 1,48 до 0,81, увеличить КПД ступени НД1 на 2,42 %, уменьшить дисбаланс расходов пара в ресиверы и нестационарность течения в камере отбора.

3. Результаты расчетных исследований отсека показывают, что использованный программный комплекс может эффективно использоваться в процессе проектирования околоотборных, паровпускных и выхлопных отсеков, и других аэродинамически сложных объектов турбостроения.

Список литературы: 1. Солодов В.Г. Численный анализ аэродинамических и энергетических характеристик отсека «ЦСД-ЦНД-1» паровой турбины К-325-23,5 / В.Г. Солодов, А.А. Хандримайлов, В.Г. Субботин, Е.В. Левченко, В.Л. Швецов, В.А. Конев // Материалы междунар. конф. «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования», Змиев, сентябрь, 2009. – Х., 2009. 2. Солодов В.Г. Аэродинамическое совершенствование конструкции, газодинамических и энергетических характеристик отсека «ЦСД-ЦНД-1» паровой турбины К-325-23,5 / В.Г. Солодов, В.Г. Субботин, Е.В. Левченко, В.Л. Швецов, В.А. Конев // Материалы междунар. конф. «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования», Змиев, сентябрь, 2009. – Х., 2009. 3. Starodubtsev Yu. V. Numerical 3D Model of Viscous Turbulent Flow in One Stage Gas Turbine and Its Experimental Validation / Yu. V. Starodubtsev, I. G. Gogolev, V. G. Solodov, Journ. of Thermal Science. – 2005. – Vol. 14, No.2. – P. 136-141. 4. Солодов В.Г. Научно-прикладной программный комплекс *MTFS*[®] для расчета трехмерных вязких турбулентных течений жидкостей и газов в областях произвольной формы / В.Г. Солодов, Ю.В. Стародубцев // Сертификат гос. регистр. авторских прав. – УГААСП. – №5921. – 07.16.2002. 5. Аэродинамические характеристики ступеней тепловых турбин / Под ред. В.А. Черникова. – Л.: Машиностроение, 1980. – 262 с. 6. Мигай В.К. Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин / В.К. Мигай, Э.И. Гудков. – Л.: Машиностроение, 1981. – 272 с.

© Солодов В.Г., Хандримайлов А.А., Левченко Е.В., Швецов В.Л., Конев В.А., 2010
Поступила в редколлегию 01.02.10